

团 体 标 准

城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价

（征求意见稿）

编制说明

2025-12-12

《城市轨道交通 地下空间韧性开发利用 评价》

（征求意见稿）编制说明

1 任务来源、协作单位

1.1 任务来源

随着城市化进程的加速，城市轨道交通地下空间的开发利用越来越受到重视。但是，地下空间的开发利用面临着多种风险和挑战，如地质环境复杂、安全隐患突出、环境保护压力增大等。为了有效应对这些挑战，提高城市地下空间的综合效益，以中铁第四勘察设计院集团有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国地质大学（武汉）等为主要编写单位，向中国城市轨道交通协会提交编制《城市地下空间韧性开发利用评价指南》团体标准的申请书。城轨协会设计咨询专委会于2024年8月23日召开立项评估会，本标准25位专家参加评审，获21位专家支持（另3人反对，1人回避弃权），赞成率84%，获得审查通过。根据《关于下达中国城市轨道交通协会2024年第三批团体标准制修订计划项目的通知》（中城轨〔2025〕1号），《城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价》获批立项，编号为：2024062—T—01，本项目的提出单位为设计咨询专委会，提出单位中铁第四勘察设计院集团有限公司，项目期限为一年。

1.2 协作单位

牵头单位：中铁第四勘察设计院集团有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国地质大学（武汉）

参编单位：同济大学、长江科学院、武汉理工大学、中建南方投资有限公司、中铁十一局集团有限公司

根据项目进展情况，后期编制过程中还会根据需要增加其他参编单位。

2 编制工作组简况

2.1 编制工作组及其成员情况

本标准编制单位组成情况如表1所示。

表1 编制单位基本情况表

序号	单位名称	单位类型
1	中铁第四勘察设计院集团有限公司	设计单位
2	中国科学院武汉岩土力学研究所	科研院所
3	中国地质大学（武汉）	高校
4	长江科学院	科研院所
5	同济大学	高校

6	武汉理工大学	高校
7	中建南方投资有限公司	业主单位
8	中铁十一局集团有限公司	建设单位

2.2 标准主要起草人及其所做的工作

本标准单位分工情况见表2所示，主要起草人及工作任务见表3所示，排名暂不分先后。

表2 单位分工情况表

章节编号	工作内容	责任单位	参加单位	编制人员
1~4	前言、引言、范围、规范性引用文件、基本规定	中铁第四勘察设计院集团有限公司	中国科学院武汉岩土力学研究所	铁四院：雷崇，孙波，谢俊 岩土所：朱勇
5.1	开发韧性评价	中国科学院武汉岩土力学研究所	同济大学、武汉理工大学、中国地质大学（武汉）	岩土所：朱勇 铁四院：谢俊，闫顺 同济：汤宇卿 武汉理工：芮瑞
5.2	防火韧性评价	中国地质大学（武汉）	中建南方投资有限公司、中铁十一局集团有限公司	地大：刘修国，花卫华 中建投：刘铮 十一局：曾灿军
5.3	防洪韧性评价	长江科学院	中国科学院武汉岩土力学研究所	长科院：黄书岭 岩土所：朱勇
5.4	抗震韧性评价	中铁第四勘察设计院集团有限公司	中国科学院武汉岩土力学研究所	铁四院：孙波，闫顺，谢俊 岩土所：朱勇
6	评分计算	同济大学	中铁第四勘察设计院集团有限公司	同济：汤宇卿 铁四院：谢俊，闫顺
7	评价报告	武汉理工大学	中国地质大学（武汉）	武汉理工：王智德 地大：花卫华
附录	附录 A、B、C、D、E、F	中建南方投资有限公司、中铁十一局集团有限公司	中铁第四勘察设计院集团有限公司	中建投：刘铮 十一局：曾灿军 铁四院：孙波，谢俊，闫顺

3 起草阶段的主要工作内容

城轨协会设计专委会于2024年8月23日召开立项评估会，主要意见共23条，采纳了12条，不采纳4条，进行了必要的解释，其他非建议性意见，均进行了必要的答复。具体修改及回复情况见表4所示。城轨协会于2025年1月3日发布立项通知，本项目获准编制名称为《城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价》的团体标准，编号为2024062—T—01，编制期限为一年。项目组于2025年01月07日在中铁第四勘察设计院集团有限公司举办了项目启动会，项目主编及参编单位中国科学院武汉岩土力学研究所、中国地质大学（武汉）、

同济大学、长江科学院、武汉理工大学、中建南方投资有限公司、中铁十一局集团有限公司代表参加了本次启动会，编制组汇报了《城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价》编制情况。中国城市轨道交通协会标准部主任任健教授级高工、设计咨询专委会陈德胜教授级高工、沈文华教授级高工莅临启动会指导并宣布《城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价》项目启动。

在本项目立项启动过程中，编制组与城轨协会保持了紧密沟通，对标准进行了多次修改，已经反映在征求意见稿中。城轨协会形式审查意见主要涉及标题的修改、编制团队的代表性、规范起草依据等方面的内容，标题及起草依据已经修改。编制团队扩展的问题，后续编制过程中逐步完善。

4 标准编制原则及与国家法律法规和强制性标准及有关标准的关系

4.1 本标准的编制原则

本标准的编制遵循了统一性、协调性、适用性、一致性、规范性和目标性等原则。统一性原则方面，本标准按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》和GB/T 20001.8-2023《标准起草规则 第8部分：评价标准》的规定进行起草，确保了标准在格式和上的统一性。对于涉及的城市轨道交通地下空间韧性开发的不同方面（如开发韧性、防火、防洪等），均采用了相似的评价体系和评分计算方法，保证了不同评估指标之间的一致性和可比性。协调性原则方面，文件中引用了大量的国家标准和行业标准，例如GB50016建筑设计防火规范、GB50909城市轨道交通结构抗震设计规范等，同时在制定过程中充分考虑了与现有法律法规和技术规范之间的关系，确保本标准能够与之有效衔接并保持协调，避免出现冲突。适用性原则方面，本标准明确规定适用于各级政府及其相关管理部门、第三方机构开展的城市地下空间韧性开发利用评价活动，也可用于城市地下空间建设、运营单位的自我评价活动，具有广泛的适用范围。同时，根据城市地下空间开发利用所处的不同阶段（规划阶段或运营阶段），提供了相应的评价重点和方法，增强了标准的实际操作性。一致性原则方面，本标准内部各章节之间逻辑严密，术语定义清晰明确，如“韧性开发利用”、“开发韧性评价”等术语都有具体的解释说明，确保了信息传递的一致性。在数据来源和取值规则上也做到了详细规定，使得不同评价主体在使用标准时能够得出一致的结果。规范性原则方面，明确了评价流程，从上级主管部门发起评价到最终形成评价报告，整个过程都有详细的步骤指导，每一项评价指标都给出了具体的分级标准和评分规则，如附录A、B、C、D中的表格所示，提高了标准执行的规范性。目标性原则方面，本标准旨在提高城市地下空间抵御经济、自然灾害（如经济衰退、火灾、

洪水、地震)的能力,通过科学合理的评价体系促进城市地下空间的安全性和可持续发展,强调发现问题并提出改进意见,以评促建,增强城市地下空间的韧性和应对突发事件的能力。

4.2 本标准与国家法律法规、强制性标准的关系

本标准在编制过程中,符合以下法律法规的规定:

- 《中华人民共和国防震减灾法》
- 《国务院关于加强防震减灾工作的意见》(国发〔2010〕18号)
- 《中华人民共和国防洪法》
- 《中华人民共和国消防法》
- 《中华人民共和国城市规划法》
- 《城市地下空间开发利用管理规定(建设部令第58号)》

本标准中所涉及的标准均符合城市轨道交通行业设计、建造、运营的相关技术标准。

4.3 本标准与上位标准或其他相关标准的比较

与本标准相关的标准主要有《GB/T 38591-2020 建筑抗震韧性评价标准》和《GB/T 40947-2021 安全韧性城市评价指南》,前者主要针对地表建筑结构的抗震韧性进行定量评价,后者主要针对城市的安全韧性进行评价,而本文件主要是针对城市地下空间开发利用韧性评价进行规范,与上述两个标准在评价对象方面存在根本不同。但本标准中涉及地下工程结构的抗震韧性,也涉及防灾综合韧性评价,韧性评价方法部分参考上述两个标准,个别条文直接引用了上述标准。由于评价对象的不同,这种参考引用是有限的。

目前,针对城市轨道交通地下空间开发利用的韧性评估尚缺乏统一的标准。因此,制定这一标准是可填补城市轨道交通地下空间开发利用韧性评估方面的标准空白,本标准的编制对于提高城市轨道交通地下空间的综合效益和安全水平,推动城市可持续发展等具有重要意义。

5 标准主要技术内容的论据或依据

5.1 标准主要技术内容

本文件规定了城市轨道交通地下空间韧性开发利用的评价方法、评价指标、评价标准。

本文件适用于各级政府及其相关管理部门、第三方机构开展的城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价活动。

主要技术内容包括:开发韧性评价、防火韧性评价、防洪韧性评价、抗震韧性评价等四部分评价内容和评分计算、评分报告的技术规定,并附开发韧性评价指标分级标准、防火韧性评价指标分级标准、防洪韧性评价指标分级标准、抗震韧性评价指标分级标准、层次分析法计算指标权重、城

市轨道交通地下空间开发利用韧性评价报告等作为附录。城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价遵循图 1 的工作流程。

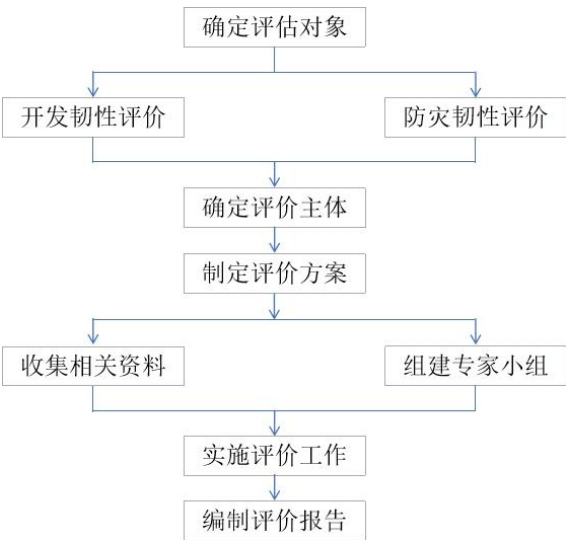


图 1 城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价流程图

5.2 本标准指标体系及取值规则

本标准主要采用打分的方法对城市地下空间开发韧性、防火韧性、防洪韧性进行综合评价，因此，首先需要构建各自的指标体系以及各指标的分级取值标准，同时考虑各指标对韧性的影响权重，采用层次分析法计算权重，由此可获得开发韧性、防火韧性、防洪韧性的综合评价结果。时程分析法是目前结构抗震韧性评价的主流方法，因此，对于地下空间结构的抗震韧性，采用时程分析法进行评价。以下分别进行介绍。

5.2.1 开发韧性指标体系

开发韧性评价包括地下空间资源潜力、开发需求和开发能力评价三个一级指标，指标体系按表 5 构建，各指标的含义及取值规则详述如下。

表 5 城市地下空间开发韧性评价指标及其取值规则

一级评价指标	二级评价指标	取值规则	
		指标定义	数据来源
资源潜力	地质灾害	影响城市地下空间开发的地质灾害种类及其严重程度	城市地质调查报告
	地形地貌	城市地表形貌特征，主要是坡度与地表高程相对高差	
	构造地质	城市与全新世活动断裂的距离	
	水文地质	地下水地质赋存及其年变化特征	
	工程地质	地层岩土性质及其岩体质量	
	岩溶	城市地下岩溶发育程度	
	沙土液化指标	沙土地层遇震液化情况	
	水土腐蚀性	水土腐蚀特征	
	土体污染	土体污染情况	
开发需求	市区常住人口	全年经常在家或在家居住6个月以上，包括流动人口	中国城市统计年

	城市人口密度	市区常住人口除以城市面积	鉴
	常住人口城镇化率	常住人口中的城镇居民比例	
	城市第三产业占比	服务业产值占GDP的比重	
	地铁日均客流	已建成地铁的日均客流量	
	地面通勤高峰交通拥堵指数	综合反映道路网畅通或拥堵的概念性指数值	
	城市汽车千人保有量	城市汽车总量×1000/城市常住人口数	
	人均地铁乘车里程	已建成地铁里程/城市常住人口数	
开发能力	城市生产总值	城市各产业的生产总值	地方统计年鉴
	城市一般公共财政预算收入	地方财政上缴完国家、省级财政收入后留给自己的部分收入，主要包括地方税收、行政事业收费、转移收入等	地方统计年鉴
	已建地铁盈利情况	已建成地铁运营年度盈利情况	国家或地方统计部门的统计年鉴
	债务率	债务率=(地方政府债务余额+隐性债务)/地方综合财力,其中,地方综合财力主要包括本级一般公共预算收入、本级政府性基金收入、上级政府补助收入以及上年结余收入和国有资本经营预算收入等	财政部

资源潜力指标包含地质灾害、地形地貌、构造地质、水文地质、工程地质、岩溶、沙土液化指标、水土腐蚀性、土体污染等九个二级指标。其中，城市地质灾害是指由于地质动力作用导致岩土体位移、地面变形以及地质自然环境恶化，危害人类生命财产安全的地质现象，就地下空间开发而言，主要是指影响城市地下空间开发的地质灾害种类及其严重程度，包括地震、崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、黄土湿陷、冻土冻融、垃圾堆积、水土污染、地下水位异常等。地形地貌是指城市地表形貌特征，主要是坡度与地表高程相对高差，地形复杂，地势起伏大，地下空间开发难度较大，这类地区通常需要采用矿山法、暗挖法等方式开挖，以适应复杂的地形条件，这些方法的施工难度大，造价较高，对技术要求也更为严格，而在平原地区则可采用明挖法或盾构法开挖，施工难度和成本相对较低。构造地质是指城市与全新世活动断裂的距离，活动断裂具有水平及垂直移动的特性，如果建筑物跨越这种部位，就可能会被拉裂，发生变形破坏，这种影响在地下空间开发中尤为显著，因为地下结构相对于地面结构更加封闭，一旦受到活动断裂的影响，修复难度和成本都会大幅增加，因此在城市规划中需要充分考虑活动断裂的分布和特性，一般应避开大规模断裂带，尤其是活动断裂进行地下空间开发。水文地质主要指地下水地质赋存及其年变化特征，其对城市地下空间开发的影响主要体现在基坑渗流与突水、地下水浮托作用和腐蚀作用等方面。工程地质主要是指地下水地质赋存及其年变化特征，其对城市地下空间开发的影响主要体现在地层承载力与稳定性、开挖难度与支护成本等方面。岩溶指标主要是指城市地下岩溶发育程度，岩溶水是赋存于可溶岩溶隙之中的地下水，岩溶水的流动会改变隧道围岩的物理性质及其水文地质条件，降低围岩强度，增加孔隙水

压力，进而降低围岩开挖后的自稳能力，增加隧道开挖难度，可能直接造成隧道涌水、突泥等灾害的发生。沙土液化指标主要是指沙土地层遇震液化情况，砂土液化会导致地基丧失承载力，使地面发生沉降或塌陷，对于地下空间开发来说，地基失效将直接导致地下结构的破坏和失稳，严重影响地下空间的安全使用。水土腐蚀性指标主要是指水土腐蚀特征，其对城市地下空间开发的作用主要是腐蚀性，腐蚀性水土中的化学成分，如氯离子、硫酸根离子、氢离子等，会与建筑材料（尤其是钢筋混凝土）发生化学反应，导致材料腐蚀，结构构件的截面减小，降低其承载能力，长期腐蚀还可能引发裂缝、剥落等现象，严重时甚至导致结构破坏。土体污染主要是指土体受有害离子影响的情况，污染物可能通过地下水、空气等途径扩散到地下空间内，影响地下空间的环境质量。另外，污染土体的处理需要采用特殊的技术和方法，如物理修复、化学修复、生物修复等，大大增加了地下空间开发的难度和成本。

资源潜力评价的二级指标主要分为三级，分别是 I（85~100）、II（65~84）和 III（<65），各指标分级标准见表 6 所示。

表 6 地下空间资源潜力指标分级评分表

一级评价 指标	二级评价 指标	指标分级		
		I（85~100）	II（65~84）	III（<65）
资源 潜力	地质灾害	地质灾害一般不发育：现状地质灾害1种或无，个别地质灾害规模小，危害小	地质灾害发育中等:现状地质灾害 2 种~3 种，或单种地质灾害规模为中小型，危害中等	地质灾害发育强烈:现状地质灾害 3 种或以上，或单种地质灾害规模达到大型，危害较大
	地形地貌	地形简单，地貌类型单一:平原(盆地)和丘陵。地面坡度小于 8°，区内相对高差小于50m	地形较简单，地貌类型单一:地面坡度以 8°~25°的为主，区内相对高差50 m~200m	地形复杂，地貌类型多样:地面坡度以大于 25°为主，区内相对高差大于 200m
	构造地质	与全新世活动断裂带的距离大于 3000m;非全新世断裂不发育	与全新世活动断裂带的距离 1000 m~3000m; 非全新世断裂较发育	与全新世活动断裂带的距离小于 1000m;非全新世断裂发育
	水文地质	含水层为单层结构，地下水位年际变化小	含水层为 2 层~3 层结构且地下水位年际变化较大	含水层为多层结构且地下水位年际变化大
	工程地质	地层以岩层为主，岩体质量 IV级以上	地层以岩层为主，岩体质量介于V级和IV级之间	地层以土层为主，力学性质差，土层中间布孤石
	岩溶	岩溶微发育：地表无岩溶塌陷、漏斗，溶沟、溶槽较发育相邻钻孔间存在临空面、且基岩面相对高差小于 2 m钻孔见洞隙率小于 10%、线岩溶率或延米线岩溶率	岩溶发育中等：介于强发育和微发育之间	岩溶发育强：地表有较多岩溶塌陷、漏斗、洼地、泉眼溶沟、溶槽、石芽密布，相邻钻孔间存在临空面、且基岩面高差大于 5m地下有暗河、伏流钻孔见洞隙率大于

	小于 5%		30%、线岩溶率或延米线岩溶率大于 20%溶槽或串珠状竖向溶润发育深度达 20 m 以上
沙土液化指标	>18	6≤指标<18	≥18
水土腐蚀性	弱或微弱	中	强
土体污染	轻微污染	中等污染	严重污染

开发需求指标包含市区常住人口、城市人口密度、常住人口城镇化率、城市第三产业占比、地铁日均客流、地面通勤高峰交通拥堵指数、城市汽车千人保有量、人均地铁乘车里程。市区常住人口是指全年经常在家或在家居住 6 个月以上，包括流动人口，市区常住人口的不断增加意味着对交通、商业、公共设施等需求的增加，这些需求在很大程度上需要通过地下空间的开发来满足。城市人口密度是指市区常住人口除以城市面积，市区常住人口密集的区域，如商业中心、交通枢纽、居民区等，这些区域地面空间有限，而人口活动频繁，因此需要通过地下空间的开发来缓解地面空间压力。常住人口城镇化率是指常住人口中的城镇居民比例，该指标反映了常住人口的城乡分布情况，随着城镇化进程的加速，越来越多的人口从农村迁移到城市，导致城市人口规模不断扩大，人口规模的增加，该指标能够反映城市地下空间开发需求的增长潜力。城市第三产业占比是指服务业产值占 GDP 的比重，随着第三产业占比的提升，服务业、零售业等行业的繁荣发展带动了地下商业设施需求的增加，地下商业街、购物中心等不仅可以缓解地面商业设施的空间压力，还能提供更加便捷、舒适的购物环境，同时，第三产业从业人员和消费者的流动性较大，对地下交通设施的需求也相应增长。地铁日均客流是指已建成地铁的日均客流量，它是衡量地铁运营效率和城市交通需求的重要指标，日均客流的增加直接反映了城市交通需求的增长。地面通勤高峰交通拥堵指数是指综合反映道路网畅通或拥堵的概念性指数值，在交通拥堵严重的城市，地面通勤高峰交通拥堵指数较高，意味着地面交通资源已经趋于饱和，难以满足日益增长的交通需求，因此，地面通勤高峰交通拥堵指数的增加会推动城市对地下空间开发的需求。城市汽车千人保有量是指城市汽车总量×1000/城市常住人口数，随着城市汽车千人保有量的增加，城市中的汽车数量也随之增长，这直接导致了停车需求上升、交通拥堵情况严重，该指标也是衡量城市地下空间交通需求增加的重要因素。人均地铁乘车里程是指已建成地铁里程/城市常住人口数，当人均地铁乘车里程较高时，意味着地铁在城市交通中扮演着重要角色，大量居民依赖地铁进行日常通勤和活动，为了满足这种高频使用需求，城市需要扩大地铁网络，增设站点和线路，从而推动地下空间的进一步开发和利

用。相反，如果人均地铁乘车里程较低，则意味着地铁系统尚未得到充分利用，或者存在其他更受欢迎的交通工具，此时，城市需要优化现有地铁网络，提高其吸引力和便捷性，而不是盲目扩大地下空间开发。

开发需求评价的二级指标主要分为四级，分别是 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）和 IV（<60），各指标分级标准见表 7 所示。

表 7 开发需求指标分级评分表

一级 评价 指标	二级评价指标	指标分级			
		I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
需求 分析	市区常住人口	≥2000万人	1000万人≤市区常住 人口<2000万人	500万人≤市区常住人口 <1000万人	300万人≤市区常住人口 <500万人
	城市人口密度	≥2000人/km2	1000人/km2≤人口密 度<2000人/km2	700人/km2≤人口密度< 1000人/km2	500人/km2≤人口密度< 700人/km2
	常住人口城镇 化率	≥90%	80%≤城镇化率< 90%	70%≤城镇化率<80%	60%≤城镇化率<70%
	城市第三产业 占比	≥70%	60%≤第三产业占比 <70%	50%≤第三产业占比< 60%	40%≤第三产业占比< 50%
	地铁日均客流	≥300万人次	150万人次≤日均客 流<300万人次	50万人次≤日均客流≤150 万人次	<50万人次
	地面通勤高峰 交通拥堵指数	≥1.8	1.6≤指数<1.8	1.4≤指数<1.6	<1.4
	城市汽车千人 保有量	≥300辆	200≤保有量<300	100≤保有量<200	<100
	人均地铁乘车 里程	≥15	12≤里程<15	9≤里程<12	<9

开发能力评价主要包含城市生产总值、城市一般公共预算收入、已建地铁盈利情况、债务率等指标。城市生产总值（GDP）作为衡量一个城市经济总体规模和实力的重要指标，高 GDP 意味着城市具有较强的经济实力，能够为地下空间开发提供充足的资金支持，包括前期的规划设计、中期的施工建设以及后期的运营管理等方面的费用，低 GDP 城市则受限于财力有限，而不具备城市地下空间开发的能力。城市一般公共预算收入是指地方财政上缴完国家、省级财政收入后留给自己的部分收入，主要包括地方税收、行政事业收费、转移收入等。当一般公共预算收入较高时，政府拥有更多的可支配财力，能够为城市地下空间开发提供充足的资金支持，并有能力投入更多资金用于地下空间基础设施的建设和维护，确保地下空间设施的正常运行和安全使用，是衡量地方政府城市地下空间开发的重要指标之一。已建地铁盈利情况是指已建成地铁运营年度盈利情况，如果已建地铁项目能够实现盈利，将直接为城市政府或地铁公司带来资金回流，这些资金可以用于

偿还地铁建设期间的债务，降低财务风险，并为未来的地铁线路扩展或其他地下空间开发项目提供资金支持。债务率由以下公式计算， $\text{债务率} = (\text{地方政府债务余额} + \text{隐性债务}) / \text{地方综合财力}$ ，其中，地方综合财力主要包括本级一般公共预算收入、本级政府性基金收入、上级政府补助收入以及上年结余收入和国有资本经营预算收入等。当地方政府债务率较高时，将直接限制政府的借贷能力，进而影响到政府对城市地下空间开发项目的资金投入，另一方面，较高的债务率意味着政府需要花费更多资源来偿还债务，也会挤占用于城市地下空间开发等基础设施建设的资金。

开发能力评价的二级指标主要分为四级，分别是 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）和 IV（<60），各指标分级标准见表 8 所示。

表 8 开发能力评价指标分级评分表

一级评价 指标	二级评价指标	指标分级			
		I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
能力 分析	城市生产总值	≥20000亿	10000亿≤GDP≤20000	5000亿≤GDP<10000	3000亿≤GDP<5000
	城市一般公共预算收入	≥2000亿	1000亿≤市区常住人口<2000亿	500亿≤市区常住人口<1000亿	300亿≤市区常住人口<500亿
	已建地铁盈利情况	无补助盈利	亏损，但亏损额不大，补助后账面盈利	亏损，亏损额大，补助后账面盈利	补助后亏损
	债务率	绿	黄	橙	红

通过上述指标体系综合考虑了城市地质、公共交通现状、社会经济、财政状况等多方面的影响因素，可以从城市地下空间资源潜力、开发需求和开发能力等三个维度，对城市地下空间开发韧性进行综合评价。评价结果可供新的地下空间开发建造参考。

5.2.2 防火韧性评价指标体系

防火韧性评价由适应力、防护力、恢复力等三个一级指标组成，其中，适应力包含四个二级准则层，分别是材料、乘客、工作人员和设备，防护力包含警报、疏散、灭火、排烟和组织响应等五个二级准则层，恢复力则主要是人员救治、设备修复、功能恢复等三个二级准则层。每个二级准则层以下还包括了指标层，具体指标体系及数据来源见表 9 所示。

表 9 城市地下空间防火韧性评价指标及数据来源

一级评价 指标	二级评价 指标	三级评价指标	取值规则	
			指标定义	数据来源
火灾适应力	材料	装饰材料防火性能	装饰材料防火性能，按GB8624分级	地铁设计报告
		结构耐火等级	地铁车站或隧道结构的耐火等级，按GB50016分级	
		电线电缆阻燃级别	电线电缆的阻燃级别，按GB / T 19666分级	
	乘客	客流风险系数	综合考虑地铁静态能力与动态输送客流能力的系数，	地铁运营方

			按DB51/T 2802—2021中的规定取值	工作报告
	工作人员	工作人员	地铁负责消防安全责任人员的职责、培训及实施情况	地铁运营方工作报告
	设备	机电设备防火等级	机电设备的防火性能，按DL/T 1061分级	地铁设计报告
		通风设备防火等级	通风设备的防火性能，按GB 51298分级	
火灾防护力	警报	监控系统	监控系统的配备情况	实地调查
		报警系统	自动报警系统的配备情况	
		广播系统	可用于紧急疏散的广播系统配备情况	
	疏散	疏散时间	地铁设计疏散时间	地铁设计报告
		疏散通道间距	地铁设计疏散通道之间的间距	
	灭火	灭火装置	灭火装置的配备情况	根据实际情况取值
		消防设施	消防设施的配备情况	
	排烟	防烟分区面积	防烟分区设计面积	
火灾恢复力	组织响应	责任部门响应	地铁运营管理单位的应急预案，责任分工，消防演练等	地铁运营方工作报告
		万人消防员数	城市消防人员数×10000/城市常住人口数	城市统计年鉴
		救援人员响应时间	119救援人员到达现场的平均时间	根据实际情况取值
	人员救治	医疗物资	地铁运营管理单位紧急医疗物资配备情况	地铁运营方工作报告
		万人卫生技术人员数	城市卫生技术人员数×10000/城市常住人口数	城市统计年鉴
		万人医疗卫生床位数	城市医疗卫生床位数×10000/城市常住人口数	
	设备修复	应急设备	应急设备的日常检修及人员配置情况	地铁运营方工作报告
		运营设备	运营设备的修复时间	
	功能恢复	功能恢复时间	地铁火灾后恢复运营所需时间	

适应力方面，二级准则材料包括装饰材料、结构、电线电缆等三个主要的指标，分别是指装饰材料、地下空间结构、电线电缆的防火性能、耐火等级和阻燃级别。乘客的适应力主要从客流风险指数的角度评价其对城市地下空间火灾的适应力，该指标综合考虑了地铁静态能力与动态输送客流能力。随着客流风险指数的增加，地铁车站和车厢内的拥挤程度也会加剧，一旦发生火灾，拥挤的环境将严重阻碍乘客的疏散速度，增加逃生难度。高客流风险指数可能加大乘客的心理压力，地下空间火灾等突发事件的发生，容易引发乘客的恐慌情绪，在拥挤的环境中，这种恐慌情绪可能迅速蔓延，导致乘客做出不理智的行为，如盲目跟从、推搡等，进一步加剧疏散难度。工作人员指标主要是指地铁负责消防安全责任人员的职责、培训及实施情况，通过明确职责、加强培训和实施有效的预案，可以提高地铁的消防安全水平，为乘客和员工的生命财产安全提供有力保障。设备主要包括机电设备和通风设备，主要是指设备的防火性能。机电产品的防火性能主要影响火灾后的修复，

而通风设备在火灾发生时能够迅速排出烟雾和有毒气体，降低火灾现场的能见度和有毒气体浓度，为人员疏散和灭火救援提供有利条件，其防火性能对于城市地下空间火灾适应性十分重要。

适应力评价的三级指标分为四个等级，分别为 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）、IV（<60），分级标准见表 10 所示。

表 10 火灾适应力指标分级评分表

一级评价指标	二级评价指标	三级评价指标	指标分级			
			I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
火灾适应力	材料防火性能	装饰材料防火性能	A	B1	B2	B3
		结构耐火等级	一级	二级	三级	四级
		电线电缆阻燃级别	A	B	C	D
	乘客	客流风险系数	<0.8	0.8~0.9	0.9~1.0	>1
	工作人员	工作人员	责任分工明确，上次接受安全培训和消防演练在半年以内，日常巡视到位	责任分工明确，上次接受安全培训和消防演练超过半年，但在1年以内，日常巡视到位	责任分工明确，上次接受安全培训和消防演练超过1年，但在2年以内，日常巡视到位	责任分工明确，上一次接受安全培训和消防演练在2年以前，未按规定进行日常巡视
	设备	机电设备防火等级	A	B	C	D
		通风设备防火性能	风管在火文条件下能够保持完整，不漏风、不漏烟，风机具有耐火性，火灾时能继续正常工作，保持通风和排烟功能	风管在火灾条件下可有少量烟气泄漏，但不漏风，风机具有防火能力，火灾时能保持正常通风和排烟	风管在火灾条件下可有少量烟气泄漏和风漏，但不影响防火分区，风机正常使用的火灾温度大于280℃，小于400℃	风管在火灾条件下可有大量烟气泄漏和风漏，但不影响建筑物整体的防火性能，风机正常使用的火灾温度低于280℃。

防护力指标方面，二级准则层主要包含警报、疏散、灭火、排烟和逃生指示五个方面。其中警报包括监控系统、报警系统、广播系统，分别指监控系统的配备情况、自动报警系统的配备情况、可用于紧急疏散的广播系统配备情况等。疏散包含疏散时间、疏散通道间距、紧急照明与导向，分别是指地铁设计疏散时间、地铁设计疏散通道之间的间距、紧急照明与导向标志的设置情况。灭火包含灭火装置和消防设施，分别是指灭火装置和消防设施的配备情况。排烟主要指防烟分区设计面积，虽然通风设备对于排烟也有重要的作用，但由于通风不仅承担排烟功能，还承担着日常通风运营工作，因此已列入适应力，主要考虑通风系统的防火性能，而不止考虑其配备情况。逃生指示是指紧急照明与导向标志设置

情况。

防护力评价的三级指标分为四个等级，分别为 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）、IV（<60），分级标准见表 11 所示。

表 11 火灾防护力指标分级评分表

一级评价指标	二级评价指标	三级评价指标	指标分级			
			I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
火灾防护力	警报	监控系统	监控全面覆盖	监控部分覆盖	监控较少覆盖	无监控
		报警系统	有报警系统和视频监控，有人值守	有报警系统和视频监控，无人值守	有报警系统，无视频监控，无人值守	无报警系统
		广播系统	有车站音响系统、警示设施和多媒体设备	有车站音响系统、警示设施，无多媒体设备	有车站音响系统，无警示设施和多媒体设备	无广播设施
	疏散	疏散时间	<4min	4~5min	5~6min	≥6min
		疏散通道间距	<20m	20~23	23~25	≥25
	灭火	灭火装置	自动喷淋覆盖全面且采用快速响应喷头，有智能灭火装置	自动喷淋覆盖全面，部分喷头采用隐蔽喷头，无智能灭火装置	自动喷淋覆盖不全，喷头采用隐蔽喷头，无智能灭火装置	无自动喷淋，无智能灭火装置
		消防设施	有大容量水池，补水可靠，公共区域有2股水柱覆盖	有大容量水池，大部分公共区域有2股水柱覆盖	无消防水池，消防栓达标，供水压力达标	无消防水池，消防栓数量不满足要求，供水压力不达标
	排烟	防烟分区面积	<100m²	100~250m²	250~500m²	>500m²
	逃生指示	紧急照明与导向标志设置	紧急照明全覆盖，导向标志较多，设置间距≤10m	大部分区域照明覆盖，导向标志设置间距大于10m，小于等于15m	部分区域照明较差，导向标志设置数量不达标，间距15m	部分区域无照明，未设置导向标志

恢复力指标方面，主要包含组织响应、设备修复、人的救援、功能恢复四个方面。其中，组织响应包含责任部门响应、万人消防员数、消防站建设情况，分别是指地铁运营管理单位的应急预案，责任分工，消防演练，城市消防人员数×10000/城市常住人口数，以及消防站布局、规模、人员响应、设施完好率及灭火器材配备的达标率等。人员救治包含医疗物资、万人卫生技术人员数、万人医疗卫生床位数等指标，分别指地铁运营单位紧急医疗物资配备情况、城市卫生技术人员数×10000/城市常住人口数、城市医疗卫生床位数×10000/城市常住人口数。设备修复包含应急设备和运营设备，分别是指应急设备的专业维修人员配备及定期检修情况，运营设备主要是指城市轨道交通运营设备的修复时间。

同样，回复力评价的三级指标分为四个等级，分别为 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）、IV（<60），分级标准见表 12 所示。

表 12 火灾恢复力指标分级评分表

一级评价 指标	二级评价 指标	三级评价 指标	指标分级			
			I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
火灾恢复力	组织响应	责任单位响应	依据国家和地方有关法律法规，制定了有针对性的应急预案，分工明确，人员定期组织演练，责任机构和人员响应迅速	依据国家和地方有关法律法规，制定了有针对性的应急预案，分工明确，有接受过培训，但组织演练频次少于2年一次	依据国家和地方有关法律法规，制定了有针对性的应急预案，分工明确，但未培训、演练	无火灾应急预案，人员未接受培训演练
		万人消防队员数	≥3万人	<3万人，≥2万人	<2万人，≥1万人	<1万人
		救援人员响应时间	≤5min	>5min，≤10min	>10min，≤15min	>15min
	人员救治	医疗物资	有医疗物资、医疗救助方案和救助站	有医疗物资、医疗救助方案，无救助站	有医疗物资，无医疗救助方案和救助站	无医疗物资和救助方案
		万人卫生技术人员数	≥50人/万人	<50人/万人，≥40人/万人	<40人/万人，≥30人/万人	<30人/万人
		万人医疗卫生床位数	≥40张/万人	<40张/万人，≥30张/万人	<30张/万人，≥20张/万人	<20张/万人
	设备修复	应急设备	配备专业工作人员，定期检修	未配备专业工作人员，有定期检修	为配备专业工作人员，定期检修落实不足	未配备专业工作人员，无定期检修安排
		运营设备	<1天	1~3天	3~7天	>7天
	功能恢复	恢复时间	<1天	1~3天	3~7天	>7天

5.2.3 防洪韧性评价指标体系

防洪韧性评价由危险性、适应力、防护力、恢复力等四个一级指标组成，其中，危险性包含历史降水和区域特征两个二级准则层，适应力包含城市防洪防涝标准和城市排水能力两个二级准则层，防护力则主要包含地铁防洪设计标准、材料渗透性、抗浮能力、组织响应、应急准备、紧急排水等六个二级准则，恢复力包含人员救治、电力修复、设备修复、功能恢复四个二级准则层。每个二级准则层以下还包括了指标层，具体指标体系见表 13 所示。

图 13 城市地下空间防洪韧性评价指标及数据来源

一级评价指标	二级评价指标	取值规则	
		指标含义	数据来源
洪灾危险性	年降雨量	城市年降雨量	国家气象信息中心网站
	24小时最大降雨量	城市有数据记载以来的24小时最大降雨量	

	洪涝区分级	城市所处洪涝区分级	地方水务部门
	内涝气象风险等级	城市内涝气象风险等级,按DB12/T 1315的规定评价	
洪灾适应力	城市防洪设计标准	城市设计防洪等级	按GBT 50805标准取值
	城市内涝防治标准	城市内涝防治设计等级	
	城市路面设计排水能力	城市路面设计排水能力	中国城市统计年鉴
	城市排水管网长度	城市排水管总长度	
	城市人均公园绿地面积	城市绿地总面积/城市常住人口	
	城镇内涝调蓄工程	城市配备的内涝调蓄工程建设情况	
洪灾防护力	防水等级	地铁结构的防水等级	地铁设计报告
	设计水位	地铁的设计水位	
	地层透水性	地铁所处地层的透水性	
	混凝土结构防渗等级	地铁车站、隧道结构混凝土防渗等级	
	抗浮设计安全系数	地铁车站、隧道结构抗浮设计标准	
洪灾恢复力	24小时暴雨预报TS评分	24小时暴雨预报TS评分, 计算公式为 $TS = \frac{H}{H+F+M}$ 式中, H表示预报有雨且实际确实下了雨的次数, F表示预测有雨但实际没有下雨次数, M表示预测无雨但实际下了雨	根据实际情况取值
	暴雨应急预案	暴雨、超常规暴雨等的应急预案	
	责任、救援部门响应	责任单位分工, 防洪演练, 119救援人员到达现场的平均时间	
	防洪物资储备	地铁专用防洪物资储备情况	
	紧急排水能力	地铁紧急排水设施的配备情况	
	医疗物资	地铁运营单位紧急医疗物资配备情况	
	万人卫生技术人员数	城市卫生技术人员数×10000/城市常住人口数	中国城市统计年鉴
	万人医疗卫生床位数	城市医疗卫生床位数×10000/城市常住人口数	
	电力修复时间	电力系统修复时间	地铁运营方工作报告
	设备修复时间	照明、机电、通风等设备的修复时间	
	功能恢复时间	地铁洪灾后恢复运营所需时间	

危险性方面, 包括历史降水、区域特征, 历史降水又包括年降雨量和 24 小时最大降雨量, 前者表示城市年降雨量, 后者表示城市有数据记载以来的 24 小时最大降雨量。区域特征则包括洪涝区分级、内涝气象风险等级, 分别指城市所处洪涝区分级和城市内涝气象风险等级。中国天气网曾根据《中国灾害性天气气候图集》绘制了我国洪涝灾害地域分布图(图 2), 由图可知, 我国中东部地区的洪涝灾害风险显著大于西(北)部地区, 洪涝灾害风险较大的区域往往也是经济发达地区和城市地下空间开发活跃的地区。近年来, 由于气候变化的影响, 传统上很少发生洪涝灾害的城市也会发生突发暴雨, 如郑州地铁 5 号线“7·20 事件”即是深刻的教训。

危险性评价的指标分为四个等级, 分别为 I (90~100)、II (75~89)、III (60~74)、IV (<60), 分级标准见表 14 所示。



图 2 我国洪涝灾害地域分布图（来源：中国天气网）

表 14 洪涝危险性评价指标分级评分表

一级评价指标	二级评价指标	指标分级			
		I（90~100）	II（75~89）	III（60~74）	IV（<60）
洪灾危险性	年降水量	<400mm	400~800	800~1200	>1200
	洪涝区分级	最少洪涝区	少洪涝区	次多洪涝区	最多洪涝区
	历史最大降雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
	城市内涝气象风险等级	蓝	黄	橙	红

适应力方面，主要包含城市防洪防涝标准和城市排水能力两个二级准则，城市防洪防涝标准又包含城市防洪设计标准、和城市内涝防治标准，分别指城市设计防洪等级和城市内涝防治设计等级。城市排水能力则包含城市路面设计排水能力、城市排水管网长度、城市人均公园绿地面积、城镇内涝调蓄工程等四个指标，分别指城市路面设计排水能力、城市排水管总长度、城市绿地总面积/城市常住人口、城市配备的内涝调蓄工程建设情况。

适应力评价的指标分为四个等级，分别为 I（90~100）、II（75~89）、III（60~74）、IV（<60），分级标准见表 15 所示。

表 15 洪涝适应力评价指标分级评分表

一级	二级评价指标	指标分级
----	--------	------

评价指标		I (90~100)	II (75~89)	III (60~74)	IV (<60)
洪灾适应力	城市防洪设计标准	一级防洪标准：重现期 ≥ 100 年	二级防洪标准：50年 \leq 重现期 < 100 年	三级防洪标准：20年 \leq 重现期 < 50 年	四级防洪标准：重现期 < 20 年
	城市内涝防治标准	100	50	30	20
	城市路面设计排水能力	十年一遇	五年一遇	三年一遇	一年一遇
	城市排水管网长度	$\geq 20000\text{km}$	$10000 \leq \text{长度} < 20000$	$5000 \leq \text{长度} < 10000$	$< 5000\text{km}$
	城市人均公园绿地面积	$\geq 20\text{m}^2$	$16\text{m}^2 \leq \text{面积} < 20\text{m}^2$	$12\text{m}^2 \leq \text{面积} < 16\text{m}^2$	$< 12\text{m}^2$
	城镇内涝调蓄工程	市区建有水体调蓄、隧道调蓄、雨水调蓄池等调蓄工程，绿地广场覆盖面积大	市区建有水体调蓄、隧道调蓄、雨水调蓄池中的两种，另建有较大面积绿地广场覆盖面积较大	市区建有水体调蓄、隧道调蓄、雨水调蓄池中的一种，绿地广场覆盖面积一般	市区仅有绿地广场调蓄工程，覆盖面积一般

防护力方面，包含地铁防洪设计标准、材料渗透性、抗浮能力、组织响应、应急准备、紧急排水能力等六个二级准则层。其中地铁防洪设计标准包括防洪设计标准、防水等级、设计水位三个指标，分别指地铁防洪设计标准、地铁结构的防水等级、地铁的设计水位。材料渗透性包括地层透水性和混凝土结构防渗等级，分别是指地铁所处地层的透水性和地铁车站、隧道结构混凝土防渗等级。抗浮能力主要是指地铁车站、隧道结构抗浮设计标准。

防护力指标分为四个等级，分别为 I (90~100)、II (75~89)、III (60~74)、IV (<60)，分级标准见表 16 所示。

表 16 洪涝防护力评价指标分级评分表

一级评价指标	二级评价指标	指标分级			
		I (90~100)	II (75~89)	III (60~74)	IV (<60)
洪灾防护力	防水等级	一级	二级	三级	四级
	设计水位	一级设计水位：设计水位低于地下空间最低点1米以上。	二级设计水位：地下空间最低点 \leq 设计水位低于地下空间平均高度。	三级设计水位：设计水位接近地下空间平均高度。	四级设计水位：设计水位高于地下空间平均高度。
	透水性指标	土体渗透系数 $K \leq 10^{-6}$ ，或岩体透水性率 $q < 0.1$	渗透系数 $10^{-6} \leq K \leq 10^{-4}$ ，或岩体透水性率 $0.1 < q < 10$	渗透系数 $10^{-4} \leq K \leq 10^{-2}$ ，或岩体透水性率 $10 < q < 100$	渗透系数 $K \geq 10^{-2}$ ，或岩体透水性率 $q > 100$
	混凝土结构防渗等级	P12	P10	P8	P6
	抗浮设计安全系数	> 2	$1.5 \leq f < 2$	$1.2 \leq f < 1.5$	$1.0 \leq f < 1.2$

恢复力方面，主要包含组织响应、应急准备、紧急排水、人员救治、电力修复、设备修复、功能恢复七个方面。组织响应包含气象部门响应、责任部门响应、救援人员响应时间三个指标，分别表示 24 小时暴雨预报 TS 评分、地铁运营管理部门责任分工和防洪演练情况，119 救援人员到达现场的平均时间。应急准备包含暴雨应急预案和防洪物资储备，

分别是指暴雨、超常规暴雨等的应急预案，地铁专用防洪物资储备情况。紧急排水能力主要指地铁紧急排水设施的配备情况。人员救治主要包括医疗物资、万人卫生技术人员数和万人医疗卫生床位数三个指标，分别指地铁运营单位紧急医疗物资配备情况、城市卫生技术人员数×10000/城市常住人口数、城市医疗卫生床位数×10000/城市常住人口数。电力修复、设备修复、功能恢复分别表示这几项的修复时间。

恢复力指标分为四个等级，分别为Ⅰ（90~100）、Ⅱ（75~89）、Ⅲ（60~74）、Ⅳ（<60），分级标准见表17所示。

表17 洪涝恢复力评价指标分级评分表

一级评价指标	二级评价指标	指标分级			
		Ⅰ（90~100）	Ⅱ（75~89）	Ⅲ（60~74）	Ⅳ（<60）
洪灾恢复力	24小时暴雨预报TS评分	≥0.5	0.5≤TS评分<1	0.1≤TS评分<0.25	<0.1
	暴雨应急预案	应急预案全面、细致，覆盖所有关键环节，具有高度的实用性和可操作性，配套资源充足，定期演练，更新机制完善，能够有效应对洪灾。	应急预案较为完整，基本涵盖了主要风险点，具备一定的实用性和操作性，资源与协调机制较为健全，定期进行部分关键环节的演练，但在某些细节或特定领域存在改进空间。	应急预案基本满足要求，明确了主要响应流程，但在资源分配、协调机制、培训与演练等方面不够充分，存在一定的风险应对漏洞，需要进一步细化和完善。	应急预案存在明显不足，缺少关键环节，操作性不强，资源配备不充分，缺乏有效的协调与演练机制，难以有效应对紧急情况，需要立即进行大幅度的修订和加强。
	责任、救援部门响应	启动响应机制时间极短（<10分钟），指挥体系清晰，具备跨部门协调能力，物资调配迅速，人员充足且分工明确，信息透明，公众服务到位。	启动响应机制时间较快（10≤t<15分钟），指挥体系良好，偶有指挥不畅，协调能力基本满足要求，物资调配基本通畅，人员紧张但基本够用，信息基本透明。	启动响应机制时间适中（15≤t<20分钟），指挥体系较为混乱，跨部门协调存在一定的障碍，物资调配不足，人员不足，公众信息沟通不足导致出现负面舆情。	启动响应机制迟缓（>20分钟），指挥混乱，部门间缺乏协调，物资调配迅速，人员不足且分工不明确，信息缺乏透明度，导致重大负面舆情。
	防洪物资储备	具备国家级（或省级）储备，储备量大，能够支持跨区域的应急响应和支援。	具备市级储备，物资储备满足一个县（市、区）的应急保障需求。	具备县级储备，物资储备只能满足两个乡镇（街道）的应急保障需要。	乡（镇）级及村级储备，适合应对较小规模的洪水或作为等待上级援助前的临时措施。
	排水能力	排水系统设计完善，设备先进，状态良好，自动化程度高，排水量大，能够迅速启动并高效运转。配有备用电源及排水队伍，可确保不间断排水。	排水系统基本满足要求，设备常规，状态良好，排水量大，应急响应速度基本满足要求。配有备用电源，应急排水队伍人员数量紧张。	排水系统设备老旧，响应时间较长，个别设备不能有效启动，排水能力有限，设备持续运转能力保障有限。	排水系统严重老化，多台设备无法正常工作，排水能力严重不足，设备亟需更新，运行保障能力严重不足。
	医疗物资	有医疗物资、医疗救助方案和救助站。	有医疗物资、医疗救助方案，无救助站。	有医疗物资，无医疗救助方案和救助站。	无医疗物资和救助方案。
	万人卫生技术人员数	≥50人/万人	<50人/万人，≥40人/万人	<40人/万人，≥30人/万人	<30人/万人
	万人医疗卫生床位数	≥40张/万人	<40张/万人，≥30张/万人	<30张/万人，≥20张/万人	<20张/万人
	电力修复	<8小时	8≤TS评分<12	12≤TS评分<24	≥24
	设备修复	<1天	1~3天	3~7天	>7天
	功能修复	<3天	3≤t<7	7≤t<15	>15天

5.2.4 抗震韧性评价

城市轨道交通地下空间结构抗震韧性评价包括以下内容：

a) 建立评价对象的土层-结构模型，模型根据相关专业图纸建立。对于既有地下空间，要求对实际建筑进行复核，材料参数宜采用振动测试等方式进行校核，结构模型中材料强度取标准值；

b) 进行设定水准地震作用下的弹塑性时程分析；

c) 根据弹塑性时程分析结果提取评价对象的工程需求参数；

d) 根据计算得到的工程需求参数，结合地下空间结构整体损伤状态判别标准，确定评价对象的损伤状态；

e) 根据评价对象的损伤状态计算其在设定水准地震作用下的韧性指标；

f) 根据评价对象在设定水准地震作用下的韧性指标，评价其抗震韧性等级。

地下空间结构抗震韧性评价流程见图 3。采用时程分析法进行地震响应分析时，所选取地震波的数量，以及持时、幅值和频谱等参数应符合 GB50011 的相关规定。要求按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于 11 组的实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线，其中实际强震记录时程的数量不应少于总数的 2/3。地下空间结构的原始工程需求参数矩阵，应按 5.4.3 弹塑性时程分析方法计算确定。每次时程分析可得到一组工程需求参数，将 11 次时程分析得到的工程需求参数组装为原始工程需求参数矩阵 $E_{(原始)}$ 。 $E_{(原始)}$ 每列表示一个特定的工程需求参数的取值，每行表示一次时程分析的结果。原始工程需求参数的分布取联合对数正态分布。原始工程需求参数矩阵应采用 GB/T38591 的方法进行工程需求参数矩阵的扩充，形成扩充后工程需求参数矩阵 $E_{(扩充)}$ 。扩充后的工程需求参数矩阵 $E_{(扩充)}$ 与原始工程需求参数矩阵 $E_{(原始)}$ 具有同样的联合概率分布，相同的均值和方差。

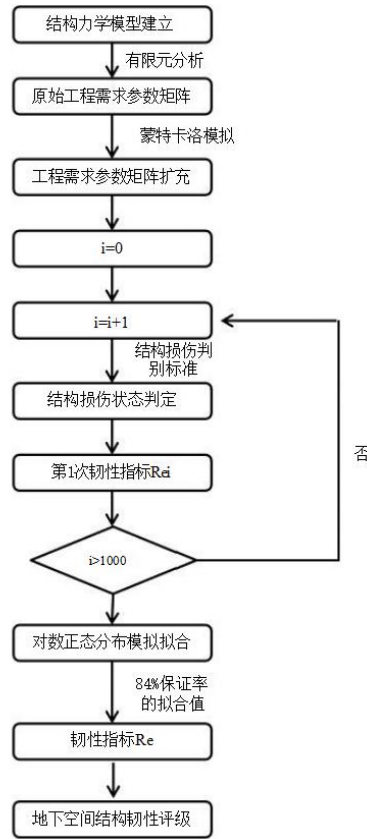


图 3 地下空间结构抗震韧性评价流程图

地下空间结构的损伤状态应由其依赖的工程需求参数，结合结构损伤状态判别标准确定。损伤状态宜分为 5 级，包括：a)无损伤（0 级）：未发生任何损伤；b)轻微损伤（1 级）：地震之后能够保持正常使用功能；c)中等损伤（2 级）：地震之后在短期之后修理，可以恢复其正常使用功能；d)严重损伤（3 级）：地震后可能会产生较大的破坏，不会整体坍塌；e)垮塌（4 级）：地震损坏后可能整体垮塌；

地下空间结构的抗震韧性指标 R_e 按式（1）计算：

$$R_e = \int_{t_{OE}}^{t_{OE}+T_{RE}} \frac{Q(t)}{T_{RE}} dt \quad (1)$$

式中：

R_e —表征地下空间结构的抗震韧性指标；

t_{OE} —为地震发生的时间点；

T_{RE} —表示为地震破坏到结构修复所需的修复时间，取值见附录 D.3；

$Q(t)$ —表示系统功能函数，反应系统实现使用功能的能力。 $Q(t)$ 按式（2）计算：

$$Q(t) = 1 - \left[L(I) \times \{ H(t - t_{OE}) - H(t - (t_{OE} + T_{RE})) \} \times f_{rec}(t, t_{OE}, T_{RE}) \right] \quad (2)$$

式中：

$L(I)$ —表示地下空间结构在地震强度 I 作用下的归一化功能损失函数，在此处简化为结构的直接经济损失率 L ，即为结构的直接经济损失与结构总重置成本的比值，取值见附录 D.4；

$f_{rec}(t, t_{OE}, T_{RE})$ —为结构在一次地震作用下的功能恢复函数，计算方法详见附录 D.5；

$H(x)$ —表示海维赛德（Heaviside）阶梯函数，表达式为（3）：

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

地下空间结构抗震韧性指标 R_e 的计算应采用蒙特卡洛方法。对于一次蒙特卡洛模拟，应取一组工程需求参数($E_{(扩充)}$ 中一行)作为输入，进行损伤状态判断，进而计算出相应的抗震韧性指标 R_{ei} 。根据多次蒙特卡洛模拟得到的地下空间结构抗震韧性指标值 R_{ei} 集合，进行对数正态分布模拟拟合，并采用具有 84%保证率的拟合值作为地下空间结构抗震韧性评价的依据。

地下空间结构抗震韧性评价采用韧性等级表达，分为四级，分别为高抗震韧性（四星）、较高抗震韧性（三星）、中等抗震韧性（二星）、低抗震韧性（一星）。地下空间结构抗震韧性等级应按表 18 评定。

表 18 地下空间结构抗震韧性等级划分标准

等级	地震水准	抗震韧性指标 R_e
高抗震韧性（四星）	罕遇地震	$R_e \geq 0.98$
较高抗震韧性（三星）	罕遇地震	$0.95 \leq R_e < 0.98$
中等抗震韧性（二星）	设防地震	$R_e \geq 0.95$
低抗震韧性（一星）	设防地震	$0.9 \leq R_e < 0.95$

5.3 韧性评价计算方法

城市轨道交通地下空间开发利用韧性采用分级打分然后综合评价的方法进行评价，打分分值确定区间为：I 级档取值 90~100 分，II 级档取值 76~89，III 级档取值 60~75，IV 级档取值 60 分以下。

将各指标得分按照公式（4）计算综合得分：

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N w_i P_i}{N} \quad (4)$$

P ——韧性评分。

w_i ——指标权重。

P_i ——指标得分。

N ——指标数量。

累计每位专家给出的韧性综合评分值，取其平均值为最终的韧性综合评分结果。

一级指标权重可采用均等权重，也可采用层次分析法进行计算，二级指标宜采用层次分析法进行计算。

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称 AHP）是一种结合定性和定量分析的决策工具，由美国运筹学家托马斯·萨蒂（Thomas L. Saaty）于 20 世纪 70 年代提出。它适用于多目标、多准则的复杂决策问题，通过构建层次结构模型，进行成对比较，实现方案的优先级排序。其计算流程如图 4 所示。具体计算步骤如下：

① 构建层次结构模型：首先，将决策问题分为目标层、准则层、方案层等多层次结构。目标层位于最顶层，代表最终决策目标；准则层位于中间，包含影响决策的各个评价准则或因素；方案层位于底层，包含待选的各种决策方案。

② 构建成对比较矩阵：针对每一层次元素，构建成对比较矩阵来量化各元素之间的相对重要性。这通常通过专家打分或集体讨论的方式进行，采用 1-9 标度（见表 19），其中 1 表示两个元素同等重要，9 表示一个元素极端重要于另一个。

③ 一致性检验：由于人的判断可能存在一定的主观性和不一致性，AHP 要求对成对比较矩阵进行一致性检验。通过计算一致性指标 CI（Consistency Index）和一致性比率 CR（Consistency Ratio），确保比较矩阵的一致性在可接受范围内（一般 CR 小于 0.1 被认为是可接受的）。

④ 计算权重：如果成对比较矩阵通过了一致性检验，就可以通过计算得到各元素的权重。这一过程通常包括求解特征根和归一化，得到各个准则或方案相对于上一层的相对权重。

⑤ 综合评价与决策：将各层次的权重逐级向上汇总，最终计算出每个决策方案相对于目标层的总权重，据此选择最优或较优的决策方案。

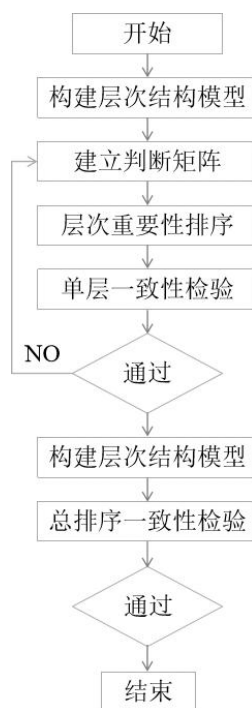


图 4 层次分析法流程

表 19 基本标度表

重要度	定义	解释
1	同样重要	两项活动对目标的重要性相当
2	轻微	
3	稍微重要	经验或判断轻微偏向于一种活动而不是另一种
4	稍微重要+	
5	明显重要	经验或判断强烈倾向于一种活动而不是另一种
6	明显重要+	
7	强烈重要	一项活动比另一项活动更受青睐；其主导性在实践中得到体现
8	强烈重要+	
9	极端重要	支持一项活动胜过另一项活动的证据具有最高可能的肯定顺序
以上互为因果	如果活动 i 与活动 j 相比有上述非零数中的一个分配给它，那么 j 与 i 相比有倒数值	
1.1-1.9	如果活动非常接近	可能很难分配到最佳值，但与其他对比活动相比，小数字的大小不会太明显，但它们仍然可以表明活动的相对重要性。

◇ 优先权：通过将矩阵提升到大幂次并对每一行求和并除以所有行的总和，或者通过将矩阵的每一行相加并除以它们的总和来近似得到精确形式。

根据综合评分计算结果及其所属开发利用阶段，按表 20 对城市地下空间韧性开发利用进行评价。其中，防灾韧性评价可按防火韧性、防洪涝韧性、抗震韧性三项综合评分相

加后取均值，防灾韧性分级与分项韧性分级标准相同。根据韧性综合评价结果，有针对性地提出城市地下空间韧性开发利用建议。

表 20 城市地下空间韧性开发利用分级评价标准

开发利用阶段	分项评价		等级	定义
规划阶段	开发韧性评价		高开发韧性	开发韧性综合评分（90~100）
			中等开发韧性	发韧性综合评分（75~89）
			低开发韧性	发韧性综合评分（60~74）
			开发韧性不足	发韧性综合评分（<60）
设计、运营阶段	防灾韧性评价	防火韧性	高防火韧性	防火韧性综合评分（90~100）
			较高防火韧性	防火韧性综合评分（75~89）
			中等防火韧性	防火韧性综合评分（60~75）
			低防火韧性	防火韧性综合评分（<60）
		防洪韧性	高防洪韧性	防洪韧性综合评分（90~100）
			较高防洪韧性	防洪韧性综合评分（75~89）
			中等防洪韧性	防洪韧性综合评分（60~74）
			低防洪韧性	防洪韧性综合评分（<60）
		抗震韧性	高抗震韧性	详见表18
			较高抗震韧性	
			中等抗震韧性	
			低抗震韧性	

6 主要试验（验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果

6.1 主要试验（验证）的分析

暂无

6.2 综述报告

随着城市化进程的加速，城市轨道交通地下空间的开发与利用已成为提高城市承载力、缓解地面空间压力的重要手段。

然而，城市轨道交通地下空间的安全韧性受到多方面的挑战。首先是气候变化的挑战，2021 年，郑州发生“7.20”特大暴雨内涝灾害，全市在短短五天内平均过程累计降雨量达到 534mm，是该市年平均降雨量的 83%，造成地铁五号线、京广北路隧道等多处发生严重积水，导致地铁车厢内 12 人死亡。毫无疑问，气候变化导致降雨量的时空突变是郑州此次洪涝灾害的罪魁祸首，据气象部门的研究显示，中国四季降雨雨量和雨日及其贡献率在冬季增加趋势最明显，夏季减少趋势最明显；1961—2015 年中国年际雨量变化趋势从东南沿海到西北内陆依次呈“增—减—增”的空间分异格局，而年际雨日变化趋势则呈“北部增加—南部减少”的空间分异格局。我国北方城市轨道交通地下空间防洪设计标准主要基于过去几

十年的降雨数据，未能及时反映气候变化带来的降雨时空突变特征，城市轨道交通地下空间防洪韧性十分脆弱。其次是火灾的挑战，城市地下是相对封闭的空间，火灾的原因远比其他类型的火灾复杂，并且存在疏散困难、扑救困难等问题，其所造成的破坏后果也远高于地面建筑火灾。从1999年到2001年，欧洲发生了几起灾难性的隧道火灾，包括勃朗峰隧道火灾、陶恩隧道火灾和戈特哈德隧道火灾，导致大量人员伤亡、隧道结构倒塌和隧道长时间关闭。2003年，韩国大邱市地铁18日发生火灾事故，造成126人死亡，146人受伤，此外还有318名失踪者。2012年，雪山南行公路隧道发生严重意外火灾，造成2人死亡，34人受伤。朱奥妮通过收集2000~2019年国内外地铁火灾事故，分析认为人为因素、设备设施故障、管理缺陷是引起地铁火灾的主要原因。城市轨道交通地下空间面临的第三个挑战是恐怖袭击，袭击方式包括爆炸性袭击、纵火性袭击、辐射袭击和生化袭击等。1995年3月，东京地铁多条线路发生沙林毒气袭击事件，造成13人死亡，约6000人受伤；2004年2月，一名自杀式炸弹袭击者在早高峰时段在莫斯科地铁上引爆爆炸物，造成41人死亡；2004年3月，西班牙马德里一系列通勤列车发生爆炸，造成191人死亡，1800多人受伤；2005年7月，四名受基地组织启发的恐怖分子在早高峰时段向三列伦敦地铁和一辆公交车引爆炸弹，造成52人死亡，近800人受伤；2010年3月，两名女性自杀式炸弹袭击者在莫斯科地铁的两个车站引爆炸弹，造成40人死亡，120多人受伤；2016年3月，一名伊斯兰国自杀式炸弹袭击者袭击了布鲁塞尔地铁站，造成16人死亡。恐怖袭击以制造恐慌为目的，一般发生在城市繁忙时段，具有突发性和时空分布的不确定性，极易造成连锁反应，火灾升温迅速，烟雾排出困难，波及人群密集，具有极大的危害。最后，城市轨道交通地下空间还面临地震的威胁，1995年，日本阪神大地震中，包括诸如地铁车站及其区间隧道等结构在内的大量大型地下结构出现严重的破坏，迫使日本修改了地铁结构抗震设计标准。从我国地震构造环境上看，北京、天津、西安、昆明等城市面临着7级及以上直下型大地震的威胁，长三角城市群面临长江口外7级地震威胁，粤港澳大湾区城市群面临珠江口外7.5级地震威胁。因此，应对地震造成的地下结构破坏是我国城市轨道交通地下空间建设无法回避的问题。

韧性(resilience)一词源于拉丁文 *resiliere*，最早应用于对生态系统的研究，认为“韧性的生态系统”是“一种抵抗外界对其产生改变的能力，能够维持生物数量及其相互关系的生态系统”^[1-2]。这一概念后来被广泛应用于社会学、经济学、气候学、城市规划等领域，Kevin C. Desouza 等针对“韧性城市”提出了一个概念性的韧性框架^[3]，将城市简化为组成部分和分析元素，以便更好地通过城市系统设计、规划和管理来增强城市的韧性。Han 等^[4]提出，

城市的韧性是指其面临自然或人为灾害冲击时的抵抗或恢复原有功能、秩序的能力，并认为地下空间可以提高城市在基础设施和环境领域的韧性。近年来“韧性城市”的概念在国内成为热门的研究话题，中国标准化研究院、清华大学等单位联合发布了《安全韧性城市评价指南》（GB/T 40947-2021）^[5]，给出了安全韧性城市评价目的和原则、评价内容和指标、评价方法和打分与计算方法，但该指南没有对城市轨道交通地下空间的韧性进行评价。另外，《建筑抗震韧性评价标准》（GB/T 38591-2020）^[6]规定了抗震韧性评价的要求、建筑损伤状态判定、建筑修复费用计算、建筑修复时间计算、人员伤亡计算、建筑抗震韧性等级评价，但该标准主要针对地上建筑结构，对于地下工程结构的抗震韧性评价没有提出具体的规定。具体韧性评价方法方面，韧性评价以定性研究为主，侧重基于系统外部风险或系统内部脆弱性分析的韧性概念框架和韧性指标体系构建，现阶段聚焦于单一基础设施系统或多基础设施组成的网络系统韧性模型与灾害情境下的仿真模拟等量化研究手段^[7]。截止目前，地铁防火韧性^[8-14]得到了较大的关注，研究成果主要集中在构筑指标体系，采用不同的方法进行综合评价。防洪韧性方面，目前的研究主要集中在城市层面，尚未有城市轨道交通地下空间防洪韧性方面的研究。抗震韧性则主要借鉴地表建筑的抗震韧性评价^[15]，成果集中在提升地下结构的抗力韧性方面^[16-19]，关于地下结构恢复韧性的研究相对较少，且仍然不深入，几乎没有韧性抗震地下结构的应用实例。开发可持续性开发利用方面的研究较多，王璇^[20]、钱七虎^[21-22]等在上世纪九十年代即提出了可持续城市化与地下空间开发利用的理念，孔令曦等^[23]构建了各种城市地下空间可持续性评价指标体系，邵继中^[24]构建了地下空间规划可持续性评价体系，乔永康等^[25]论述了面向可持续发展的城市地下空间开发外部性价值评估方法，张亮等^[26]分析了基于绿色生态地下空间开发利用评价标准编制。von der Tann L 提出了从城市地下空间到可持续地下城市的概念^[27]。

目前城市轨道交通地下空间韧性的研究尚处于起步阶段，虽然有韧性城市评价指南和建筑抗震韧性评价标准作为参考，但地下空间的韧性毕竟与城市的韧性以及地表建筑结构抗震韧性不同，上述标准可供参考但不能完全照搬。因此，编制城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价标准，有助于提升我国城市轨道交通地下空间韧性开发利用水平，为建设安全韧性的城市轨道交通地下空间提供评价依据和参考标准。

6.3 技术经济论证

本标准的技术经济论证可从技术可行性、经济效益、社会效益和环境效益等多个维度进行综合分析。

在技术可行性方面，本标准体系展现了全面性和科学性，覆盖了城市轨道交通地下空

间开发的各个方面，包括开发韧性、防火韧性、防洪韧性和抗震韧性。为每种韧性提供了详尽的评价指标体系，这些指标从资源潜力、开发需求到开发能力等多个维度进行评估，展现了高度的系统性和科学性。通过采用层次分析法（AHP）来计算指标权重，确保了评分过程的客观性和公正性。利用蒙特卡洛模拟等先进技术手段进行地震响应分析，提升了评估结果的精确度。此外，本标准具有很强的可操作性，文件中明确了具体的评价流程，并提供了详尽的工作指南，使得各级政府管理部门、第三方机构以及城市地下空间建设运营单位能够依照标准化流程执行评价任务。各类评价指标分级标准（附录 A、B、C、D）为实际操作提供了明确的指导，便于不同背景的专业人员理解和应用。

在经济效益方面，实施本标准有助于提前识别城市轨道交通地下空间在抵御自然灾害方面的薄弱环节，从而采取有效的预防措施，减少因灾害导致的直接经济损失。增强地下空间的开发韧性可以延长基础设施的使用寿命，降低维护和修复成本。遵循严格的安全标准意味着更低的投资风险，有利于吸引更多的社会资本参与城市地下空间项目开发，促进地方经济发展。

在社会效益方面，本标准能够提升城市轨道交通地下空间的公共安全水平，强化地下空间的防灾减灾能力，有利于保障公众的生命财产安全和社会稳定。同时，注重生态环境保护，在评价体系中纳入了水土腐蚀性、土体污染等环境因素的考量，有助于实现城市的绿色可持续发展目标。

在环境效益方面，本标准有助于减少环境破坏，例如，在防洪韧性评价中强调城市排水系统的设计标准及内涝调蓄工程的重要性，有助于减轻暴雨洪水对城市生态环境的影响。在地下空间开发过程中考虑地质灾害等因素，避免不当施工造成新的生态问题。

因此，制定并实施《城市轨道交通地下空间韧性开发利用评价》国家标准具有显著的技术优势和社会价值。它不仅能够提升城市应对突发事件的能力，保障人民生命财产安全，还能带来长远的经济效益，推动社会经济与自然环境的协调发展，对于当前及未来城市规划与发展具有重要意义。

6.4 预期的经济效果

本文件可为城市轨道交通地下空间开发利用提供全面的指导和建议，帮助相关企业和机构避免开发利用过程中出现安全问题，提高地下空间的综合效益。统一城市轨道交通地下空间韧性开发利用的相关标准，促进城市轨道交通地下空间的规范开发、科学管理和高效利用。吸纳各行业专家的意见和建议，引进了最新的技术和管理方法，从而推动城市轨道交通地下空间开发利用产业的创新和发展。

7 采用国际标准的程度及水平的简要说明

本文件未采用国际标准。

8 重大分歧意见的处理经过和依据

暂无。

9 贯彻标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）

（一）标准培训工作的要求和建议

（1）明确培训目标，确保所有参与城市地下空间开发与运营的人员了解并掌握本标准的内容，特别是关键的技术指标和评价方法。提升相关人员对韧性城市理念的理解，增强其在实际工作中应用标准的能力。

（2）制定详细的培训计划，分阶段、分层次地组织培训活动。例如，针对不同背景（如政府管理部门、第三方评估机构、建设运营单位）的人员设计不同的培训课程。培训内容应包括基础理论讲解、案例分析以及实地考察等多样化的教学形式。

（3）邀请专家授课，邀请参与标准起草的专业人士或行业内知名专家进行授课，确保信息准确权威。通过互动环节解答学员疑问，提升培训效果。

（4）建立在线学习平台，利用网络资源开设线上课程，方便无法参加现场培训的人员随时随地学习。平台上提供标准文本下载、视频教程、模拟测试等功能，帮助学员更好地理解 and 记忆标准内容。

（二）推广应用标准的手段和方式建议

（1）争取政策支持，由政府部门出台相关政策，要求相关项目必须按照该标准执行，并将其纳入项目审批流程中。设立专项资金或奖励机制，鼓励企业主动采用新标准改进现有设施。

（2）媒体宣传，通过报纸、杂志、电视及社交媒体等多种渠道广泛宣传标准的重要性和实施成效，提高公众认知度。发布成功案例报道，展示标准在实际应用中的积极作用，激发更多单位和个人的关注兴趣。

（3）行业交流，定期举办研讨会、论坛等活动，促进同行间的经验分享和技术交流。组织参观学习优秀示范工程，直观感受标准带来的变化与优势。

（三）标准贯彻效果检查和评估的建议

（1）建立监督检查机制，成立专门的监督检查小组，定期对已实施项目的合规情况进行审查。明确检查的重点领域和具体要求，确保检查工作的针对性和有效性。

（2）开展第三方评估，聘请独立的第三方机构对标准执行情况进行全面评估，保证评估结果的客观公正性。评估过程中不仅要关注技术指标是否达标，还要考量经济效益和

社会效益等方面的表现。

（3）反馈改进机制，建立畅通的信息反馈渠道，收集各方意见和建议，及时调整和完善标准内容。根据评估结果总结经验教训，形成书面报告供后续工作参考借鉴。

（4）持续优化标准，结合科技进步和行业发展动态，适时修订标准条款，保持其先进性和适用性。引入国际上先进的管理理念和技术手段，不断提升我国城市地下空间开发利用的整体水平。

10 其他应予说明的事项，如涉及专利的处理等

本文件暂不涉及未授权使用的专利。